УДК 621.315.592

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МДП-СТРУКТУРЫ ПО МЕТОДУ ТЕРМАНА

В.Н. Давыдов, П.Е. Троян, Н.Г. Зайцев

Томский университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: kolan317_1@mail.ru

Проанализированы модели расчета высокочастотных вольт-фарадных характеристик. На основе выбранной модели разработана программа расчета параметров МДП-структуры, а также идеальной вольт-фарадной характеристики и плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик.

Введение

Методы исследования структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) широко развиты, что позволяет определить любой параметр, характеризующий качество границы раздела полупроводник-диэлектрик и диэлектрического слоя. Наличие на границе раздела неоднородностей, обусловленных дефектами различного рода, приводит к изменению энергетического спектра электрона на поверхности по сравнению с объемом полупроводника. Наиболее полная информация о состоянии границы раздела содержится в энергетическом спектре плотности поверхностных состояний (ППС, $N_{ss}(E)$). Для его расчета, как правило, используют вольт-фарадные характеристики (ВФХ), измеренные на низкой (НЧ) или высокой (ВЧ) частотах. Использование для расчета $N_{ss}(E)$ той или иной ВФХ имеет свои преимущества и недостатки.

Основным преимуществом метода НЧ ВФХ по сравнению с методом ВЧ ВФХ является возможность определения $N_{ss}(E)$ в более широком диапазоне энергий в запрещенной зоне. В отличие от ВЧ метода, метод НЧ позволяет исследовать не только в области обеднения-обогащения, но и сильной инверсии. Несмотря на это предпочтительнее использовать ВЧ метод, т. к.:

- Измерения ВЧ ВФХ характеристик технически проще.
- Максимально достижимая чувствительность определения $N_{ss}(E)$ в ВЧ методе составляет 10^8 см$^{-2}$эВ$^{-1}$ (в НЧ методе – 10^{10} см$^{-2}$эВ$^{-1}$).
- Для использования ВЧ свойств полупроводников можно использовать характеристики МДП-структур с диэлектриком, имеющим сквозные токи порядка 10^{-9} А/мм^2 (в НЧ методе ток утечки не должен превышать 10^{-15} А/мм^2).

Существует много методов вычисления плотности поверхностных состояний по ВЧ ВФХ (см., например [1]). В этой связи необходимо их сравнение по выбранным критериям: точности определения ППС, анализируемого энергетического диапазона.

Целью данной работы является разработка программы расчета параметров МДП-структуры и построения зависимости $N_{ss}(E)$ по методу Термана, который основан на теоретически измеренной ВЧ ВФХ.

Метод Термана

В предположении однозарядового поверхностного состояния (ПС) ППС может быть определена по сдвигу экспериментальной ВФХ относительно расчетной. Если все зарядовые центры, локализованные вблизи границы раздела, как со стороны полупроводника, так и со стороны диэлектрика, «собрать» на границу раздела, то спектр ППС может быть определен с помощью выражения [1]:

$$N_{SS}(y_s) = \frac{C_{диэл}}{q}\frac{d\Delta V(C)}{dy_s}, \quad (1)$$

где $C_{диэл}$ – емкость диэлектрика, q – элементарный кулоновский заряд, y_s – безразмерный поверхностный потенциал, $\Delta V(C)$ – разность напряжений между теоретической и экспериментальной ВФХ при заданном значении емкости.

Как следует из выражения (1), для построения зависимости $N_{ss}(y_s)$ необходимо выполнить следующие операции:

- по экспериментально найденным значениям емкости МДП-структуры в режиме обогащения и сильной инверсии построить теоретическую ВФХ при отсутствии каких-либо ПС;
- сравнивая экспериментальную и теоретическую ВФХ, определить зависимость $\Delta V(C)$;
- с помощью теоретической ВФХ $C(y_s)$ из зависимости $\Delta V(C)$ построить $\Delta V(y_s)$;
- продифференцировав по поверхностному потенциалу зависимость $\Delta V(y_s)$ и используя (1), построить спектр поверхностных состояний $N_{ss}(y_s)$.

2. Расчет теоретической высокочастотной ВФХ

2.1. Классическое решение

Выражение для теоретической ВЧ ВФХ может быть легко получено в рамках модели Гаретта-Брэттана исключением из области пространственного заряда (ОПЗ) заряда неосновных носителей [2]. Это объясняется их неподвижностью в поле ВЧ тестового сигнала. Тогда выражение для расчета ВЧ ВФХ области пространственного заряда будет иметь вид:

$$C_{ОПЗ} = \frac{\mathrm{sign}(y_s)\varepsilon\varepsilon_0\lambda^{-1}(1-e^{y_s})}{2L_Д[\lambda^{-1}(e^{y_s}-1)+(\lambda-\lambda^{-1})y_s]^{1/2}}, \quad (2)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника, ε_0 – электрическая постоянная, $L_Д$ – длина Дебая собственного полупроводника, $\lambda = \frac{n_i}{n_0} = \frac{p_0}{n_i}$, где n_i – собственная концентрация носителей в полупроводнике, p_0, n_0 – концентрация ионизованных акцепторов, доноров в примесном полупроводнике.

Рассчитанный по (2) график зависимости ВЧ ВФХ от y_s показан на рис. 1, *а*. Выражение (2) получено в предположении, что подвижные носители заряда подчиняются статистике Максвелла-Больцмана, но т. к. при больших поверхностных потенциалах y_s возможно их вырождение, то это приведет к ошибке в определении $C_{ОПЗ}$, рассчитанной по (2). Следовательно, в указанных областях поверхностного потенциала (обогащение, инверсия – сильная инверсия) величина расчетной емкости будет завышена по отношению к реальной. Это приведет к ошибке в определении ППС.

2.2. ВФХ характеристика с использованием распределения Ферми-Дирака

Согласно [3] выражение ВЧ ВФХ для полупроводника *n* типа на участке обогащения и обеднения выглядит следующим образом:

$$C_{ОПЗ}(y_s) = \operatorname{sign}(y_s)\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{L_Д}\cdot\frac{H_1(y_s)}{G_1(y_s)}, \quad y_s \geq y_{inv}, \qquad (3)$$

где $H_1(y_s) = -\frac{1}{\lambda}\cdot\frac{\delta_d \exp(W_{DF}-y_s)}{1+\delta_d \exp(W_{DF}-y_s)} + \frac{F_{1/2}(W_{FC}+y_s)}{F_{1/2}(W_{I\,C})}$,

$$G_1(y_s) = \left[\frac{1}{\lambda}\cdot\ln\left(\frac{1+\delta_d \exp(W_{DF}-y_s)}{1+\delta_d \exp(W_{DF})}\right) + \frac{2}{3}\frac{F_{3/2}(W_{FC}+y_s)-F_{3/2}(W_{FC})}{F_{1/2}(W_{I,C})}\right]^{1/2},$$

где δ_d – отношение краткости вырождения основного состояния ионного остатка к краткосрочности вырождения основного состояния нейтрального донора, $F_{1/2}(\eta)$, $F_{3/2}(\eta)$ – интеграл Ферми-Дирака степени 1/2 и 3/2, W_{DF} – энергия от уровня энергии донора до уровня Ферми в легированном полупроводнике, W_{FC} и W_{IC} – энергия от уровня Ферми в легированном полупроводнике и энергия от уровня Ферми в собственном полупроводнике до дна зоны проводимости, y_{inv} – соответствует границе между инверсий и обеднением.

Расчет ВЧ ВФХ по (3) представлен на рис. 1, *б*. Видно, что при использовании распределения Ферми-Дирака при больших y_s ВФХ становится более плавной по сравнению с (2). Изменение статистики при больших y_s по очевидным причинам приводит также к большему значению емкости ОПЗ в режиме «инверсия – сильная инверсия». Недостатком расчета ВЧ ВФХ этим методом является необходимость вычисления огромного количества интегралов Ферми-Дирака, например, с помощью полиномов Лагерра.

Согласно [2], максимальная ошибка в определении емкости ОПЗ при 300 К для минимального значения емкости ОПЗ равна 100 %, а для емкости плоских зон – 23,5 %.

2.3. ВФХ кривая с перераспределением носителей заряда инверсионного слоя

Данная модель рассчитывается при следующих физических предположениях [4]:

- Равновесие по постоянному смещению. Для измерений ВФХ это эквивалентно тому, что скорость нарастания напряжения недостаточна для избежания глубокого обеднения.
- Учет внутреннего неравновесия носителей заряда в инверсионном слое, связанного с их высокой инерционностью и малым периодом тестового ВЧ сигнала. Это приводит к эффекту перераспределения носителей заряда, который не учитывался в предыдущих расчетах.

Согласно [4] выражение для ВЧ емкости области пространственного заряда в полупроводнике *p* типа имеет вид:

$$C_{ОПЗ} = C_{SLF} + \frac{\varepsilon\varepsilon_0\cdot e^{y_s}}{2L_Д{}^2 y_s'}\cdot\frac{1}{1+y_s'\exp(-(y_s+y_b))\int\limits_0^{y_s}\frac{\exp^y}{(y_s')^3}\cdot dy}, \qquad (4)$$

где C_{SLF} – низкочастотная емкость ОПЗ в полупроводнике, y_b – потенциал объема $-\ln\left(\frac{p_0}{n_i}\right)$ – для полупроводников *p* типа, y_s' – первый интеграл,

$$(y_s')^2 = \frac{2}{L_Д{}^2}(\operatorname{ch}(y_s) - y_s\operatorname{sh}(y_b) + \operatorname{ch}(y_b) + y_b\operatorname{sh}(y_b)),$$

$$C_{SLF} = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{L_Д{}^2\cdot y_s'}(\operatorname{sh}(y_s) - \operatorname{sh}(y_b)).$$

Расчет ВФХ по (4) представлен на рис. 1, *в*. Полученное значение емкости хорошо совпадает во всем диапазоне с методом, представленным в п. 2.1. Принципиальным недостатком этого метода расчета является наличие глубокого минимума вблизи точки (функция меняет свой знак вблизи указанной точки) (рис. 1, *в*). Использование данного метода для расчета ППС без операций сглаживания кривой невозможно ввиду принципиального искажения ВФХ.

Таким образом, для вычисления спектра ПС в режиме реального времени наилучшим образом подходит расчет ВЧ ВФХ по выражению (2). Возникающая в результате его использования ошибка в спектре ПС существенна лишь в области обогащения и сильной инверсии, где ППС, по методу Термана, рассчитывается с большой ошибкой [5].

3. Описание программы

Используя методику расчета ППС МДП-структуры, написана программа, позволяющая на основе экс-

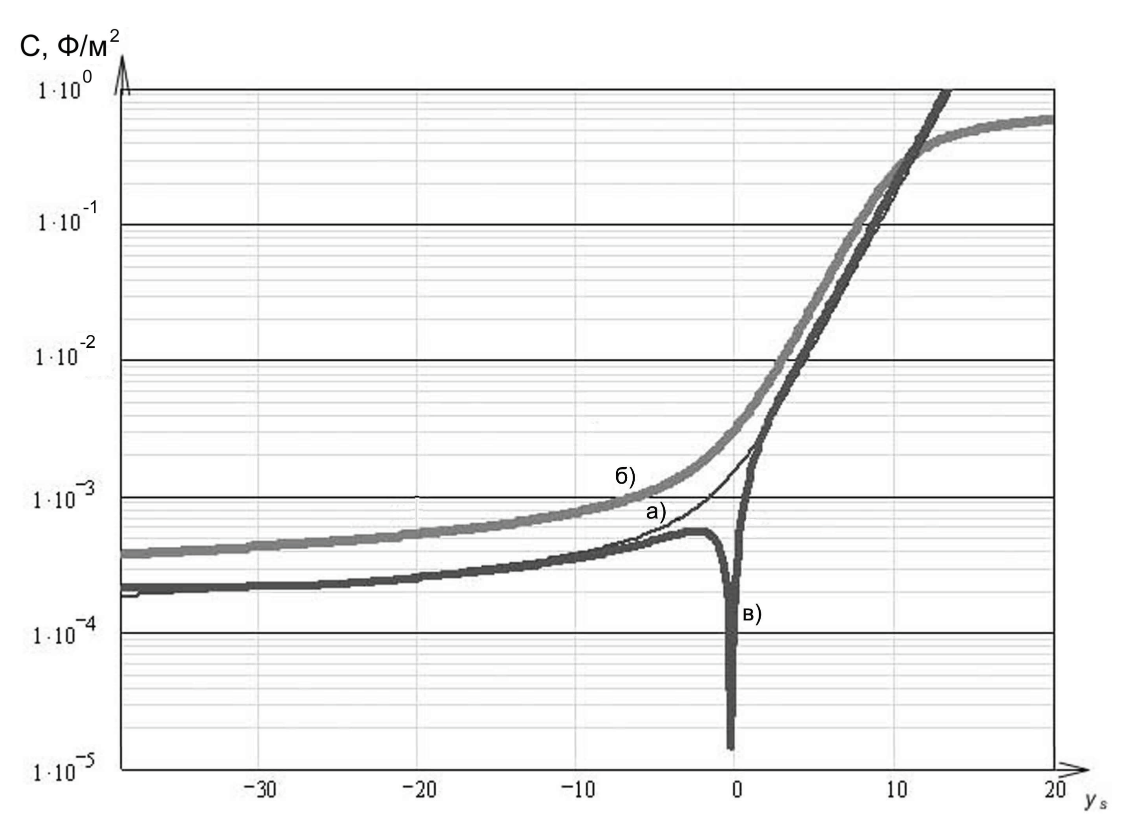


Рис. 1. *ВЧ ВФХ зависимости ОПЗ в идеальной МДП-структуре: а) классическая, б) с применением распределения Ферми-Дирака, в) с учетом перераспределения носителей заряда инверсного слоя*

периментальных ВЧ ВФХ определять $N_{ss}(E)$, а также основные параметры МДП-структуры. Вид пользовательского интерфейса программы показан на рис. 2.

Окно программы имеет четыре вкладки:

Вкладка «Измерение»

На ней находится набор элементов для управления измерительным комплексом «МЕТРОНОМ-2», описанным в работе [6];

Вкладка «Расчет параметров МДП-структуры»

Здесь осуществляется открытие ранее сохраненных данных при нажатии кнопки «Открыть». Имеется возможность одновременного построения 10-ти графиков. Если открытые данные ВФХ не устраивают оператора по каким-либо причинам, то их можно обнулить, указав номер обнуляемого графика в элементе ComboBox с названием «График» и нажав кнопку «Сброс». Построенные графики можно сохранить в виде массива чисел. Так же возможно распечатать отображаемые результаты ВФХ.

Перед началом расчета параметров МДП-структуры необходимо указать следующее: материал полупроводника, материал диэлектрика, площадь полевого электрода МДП-структуры, температура, при которой проводилось измерение. Путь к последнему открытому файлу с данными отображается в поле «Путь». Расчет параметров МДП-структуры осуществляется нажатием кнопки «Расчет».

Рассчитывается выбранный график согласно алгоритму, изложенному выше. Для того чтобы из расчета исключить случайные ошибки в величине емкости перед началом расчета параметров МДП-структуры осуществляется согласование экспериментальной ВФХ при помощи алгоритмов сглаживания. Чувствительность сглаживающего алгоритма к различного рода ошибкам на ВФХ задается в текстовом поле с названием «Коэффициент сглаживания». На рис. 2 показана экспериментальная кривая, полученная при коэффициенте сглаживания 10^{-3} и отмеченная численными значениями $C_{диэл}$, емкости плоских зон и емкости в инверсии.

Из сглаженной экспериментальной кривой ВЧ ВФХ определяется емкость диэлектрика, емкость плоских зон, а также минимальная емкость ОПЗ и соответствующие им напряжения. Полученные значения емкостей отображаются на сглаженной ВФХ кривой в виде значений емкостей (рис. 2). Кроме этого, используя данные о МДП-структуре, рассчитываются следующие параметров: тип проводимости полупроводника, толщина диэлектрика, максимальная ширина ОПЗ, концентрация доноров (акцепторов), емкость плоских зон, напряжение плоских зон, встроенный заряд в диэлектрике и на поверхностных состояниях границы раздела полупроводник-диэлектрик.

Используя рассчитанные параметры, строится теоретическая ВФХ по формуле (2). Как показано выше, данное выражение оптимальным образом описывает емкость ОПЗ в идеальной МДП-структуре. Пересчитанная функция емкости от поверхностного потенциала $C(y_s)$ в функцию от напряже-

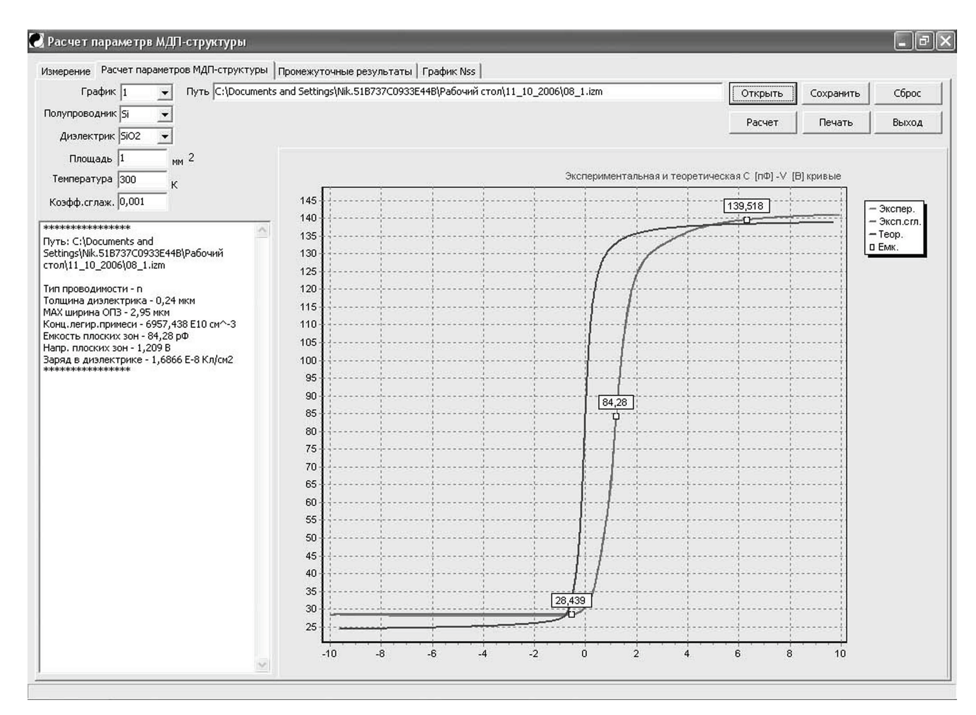


Рис. 2. *Вид пользовательского интерфейса*

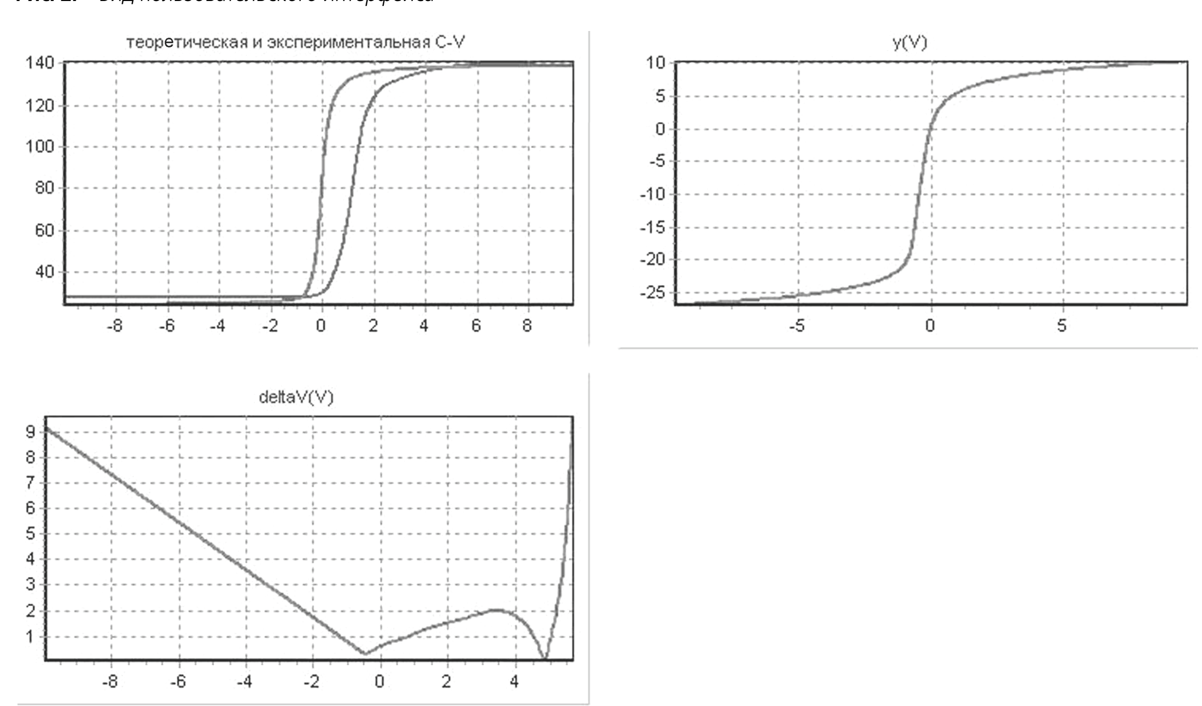


Рис. 3. *Вкладка «Промежуточные результаты»*

ния $C(V)$ отображается на графике вместе с экспериментальными данными.

Вкладка «Промежуточные результаты»

Для контроля правильности расчета параметров на вкладке «Промежуточные результаты» выводятся три графика (рис. 3): теоретическая и экспериментальная сглаженная ВФХ, зависимость поверхностного потенциала y_s от приложенного напряжения, разность напряжений между теоретической и экспериментальной кривыми при заданном значении емкости от приложенного напряжения.

Вкладка «График N_{ss}»

Здесь (рис. 4) отображается рассчитанный по ур. (1) спектр ППС МДП-структуры.

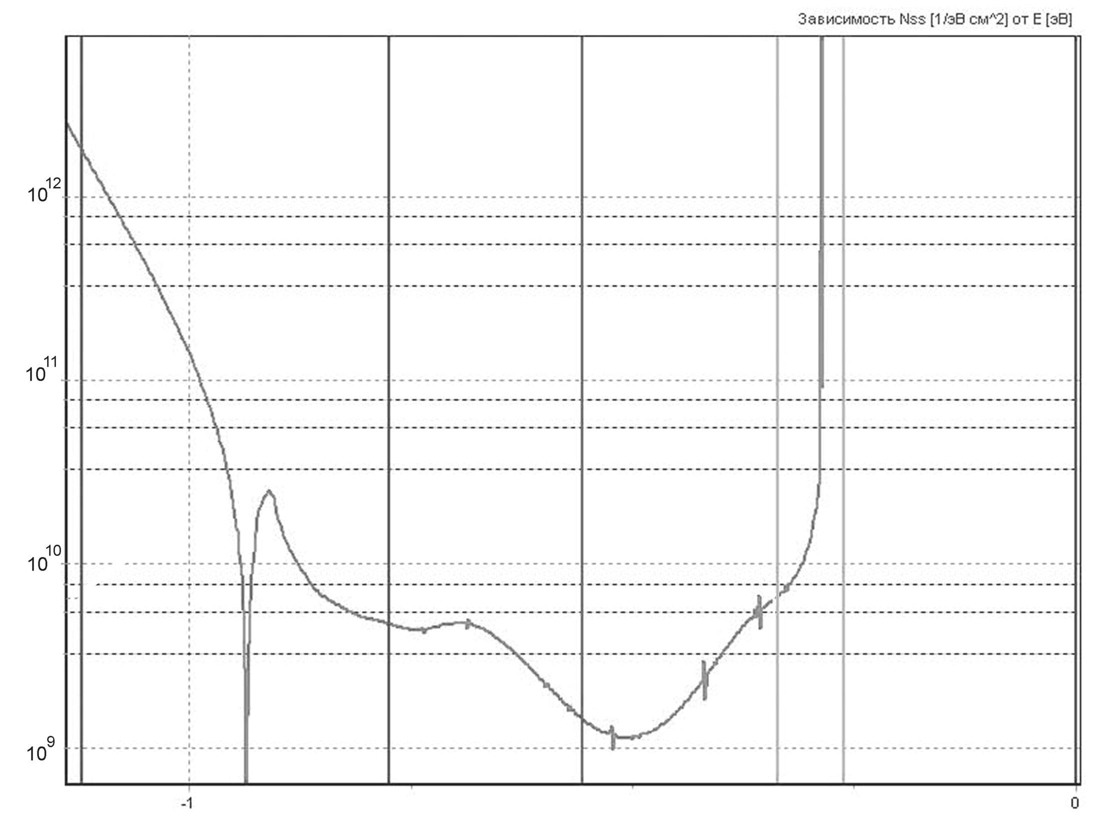


Рис. 4. *Вкладка «График N_{ss}»*

Для качественной оценки рассчитанных данных на графике отмечены энергии, соответствующие дну зоны проводимости (E_c), потолку валентной зоны (E_v), уровень Ферми (E_f), а также симметричному уровню Ферми относительно такового в собственном полупроводнике ($2E_f$), уровню Ферми в собственном полупроводнике (E_i), уровню энергии, при которой наступает глубокая инверсия ($2\ln(\lambda)–3$). Полученная зависимость $N_{ss}(E)$ может быть сохранена в виде точечного рисунка и распечатана на принтере. Как можно видеть, полученный спектр ППС имеет классическую *U*-образную форму и типичные значения ППС для кремниевых МДП-структур. В дополнение к этому рассчитанный спектр ППС демонстрирует наличие локальных минимумов ППС вблизи середины запрещенной зоны полупроводника. Данное обстоятельство является спецификой использованной МДП-структуры, связанной с особенностями технологии ее изготовления и обработки.

Заключение

Разработана программа расчета параметров МДП-структуры, позволяющая на основе экспериментальных высокочастотных ВФХ определить тип проводимости полупроводника, толщину диэлектрика, максимальную ширину ОПЗ, концентрацию доноров (акцепторов), емкость и напряжение плоских зон, величину суммы встроенного заряда в диэлектрике и на поверхностных состояниях раздела полупроводник-диэлектрик.

Используя параметры МДП-структуры, программа позволяет рассчитать теоретическую ВФХ и спектр плотности поверхностных состояний, что может иметь самостоятельное применение.

Все результаты расчетов отображаются в графической форме и могут быть сохранены или распечатаны на принтере. Программа имеет удобный пользовательский интерфейс с возможностью просмотра промежуточных результатов расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колешко В.М., Каплан Г.Д. C-V методы измерения параметров МОП-структур. – М.: ЦНИИ Электроника, 1977. – 83 с.
2. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. Пер. с англ. под ред. А.Ф. Трутко. – М.: Энергия, 1973. – 656 с.
3. Карамышев В.П. Влияние функции распределения на теоретическую емкость области пространственного заряда полупроводника в МДП-структуре // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. – 1976. – № 3(63). – С. 13–18.
4. Berman A. Model of high-frequency capacity MOS – the structures, based on redistribution of a charge inversion a layer // Solid State Electron. – 1974. – V. 17. – № 7. – P. 735–742.
5. Войцеховский А.В., Давыдов В.Н. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников. – Томск: Радио и связь, 1990. – 230 с.
6. Беляев С.В., Давыдов В.Н., Зайцев Н.Г. Измерительные возможности автоматизированного комплекса «МЕТРОНОМ-2» // Научная сессия ТУСУР-2006: Матер. Всеросс. конф. – Томск, 2006. – Ч. 4. – С. 12–15.